

(2) Japanese Patent Application Laid-Open No. 5-281293 (1993):
“METHOD FOR PERFORMING SIMULATION OF AN INTEGRATED CIRCUIT”

The following is an extract relevant to the present application.

The present invention provides a method for performing simulation of an integrated circuit capable of analyzing a precise and more realistic worst case and improving accuracy of circuit design.

Embodiments of the present invention will be discussed in detail referring to the drawings. Figure 1 is a main flow chart illustrating procedural steps of a method for performing simulation of an integrated circuit according to the present invention. In Figure 1, initially, upper and lower limits and their correlation data of an element parameter, such as a saturation current I_s of a transistor, a common-emitter DC amplification factor h_{FE} , a forward Early voltage V_A and the like are inputted from an input section of an analysis device (not shown) (step S11). Next, an approximate expression of a boundary condition defining a correlation range of the element parameters is derived (step S12). Then, a worst case is obtained using nonlinear programming with the boundary condition of the correlation range of the element parameters derived as a limiting condition (step S13). Lastly, the analysis result is displayed on a display section of the above analysis device (step 14).

(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開平5-281293

(43)公開日 平成5年(1993)10月29日

(51)Int.Cl.⁵
G 0 1 R 31/28
G 0 6 F 15/60

識別記号 370
府内整理番号 7922-5L
6912-2G

F I
G 0 1 R 31/28

技術表示箇所
F

審査請求 未請求 請求項の数2(全6頁)

(21)出願番号 特願平4-105907

(22)出願日 平成4年(1992)3月31日

(71)出願人 000002185
ソニー株式会社
東京都品川区北品川6丁目7番35号
(72)発明者 盧 金勤
神奈川県横浜市保土ヶ谷区神戸町134番地
ソニーLSIデザイン株式会社内
(72)発明者 小川 公裕
東京都品川区北品川6丁目7番35号 ソニ
一株式会社内
(72)発明者 山口 二男
東京都品川区北品川6丁目7番35号 ソニ
一株式会社内
(74)代理人 弁理士 船橋 国則

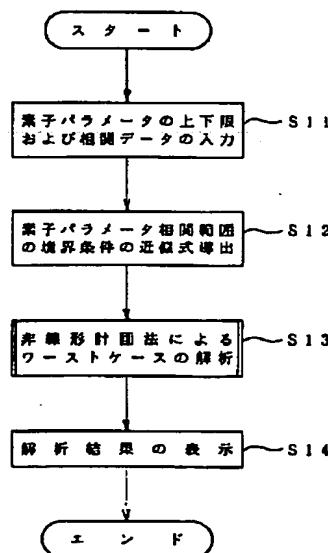
最終頁に続く

(54)【発明の名称】 集積回路シミュレーション方法

(57)【要約】

【目的】 的確且つより現実的なワーストケースを解析でき、回路設計の確度の向上を可能とした集積回路シミュレーション方法を提供する。

【構成】 集積回路のワーストケース解析において、非線形計画法を用いてシミュレーションを行う際に(ステップS13)、素子パラメータの相関範囲を規定とともに、この素子パラメータの相関範囲を規定するのに、線形近似により相関範囲の境界条件を規定した式を用いる(ステップS12)。



本発明の一実施例のフローチャート

1

【特許請求の範囲】

【請求項1】 集積回路のワーストケース解析において、非線形計画法を用いてシミュレーションを行う際に、素子パラメータの相関範囲を規定したことを特徴とする集積回路シミュレーション方法。

【請求項2】 前記素子パラメータの相関範囲を規定するのに、線形近似により相関範囲の境界条件を規定した式を用いたことを特徴とする請求項1記載の集積回路シミュレーション方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【産業上の利用分野】本発明は、集積回路シミュレーション方法に関し、特に集積回路の素子パラメータの変動による回路特性のワーストケース解析に用いて好適なシミュレーション方法に関する。

【0002】

【従来の技術】回路のワーストケース解析問題には、確率論的手法と決定論的手法がある。一般に、確率論的手法は計算量が膨大なため、設計現場への適用が困難と思われる。一方、決定論的手法としては頂点解析法が周知である。この解析法は、原理が簡単、且つ必要とする回路シミュレーション回数が少ない特徴を有しているので、産業界において良く用いられる手法である。

【0003】

【発明が解決しようとする課題】ところが、頂点解析法は、回路特性が素子パラメータに対して単調であることを必要とするため、回路特性の単調性が保証できない限り、過小評価の結果を招くことになる。一般に、回路特性の単調性があるかどうかわからないため、頂点解析法による評価結果が設計失敗を招く虞れがある。

【0004】また、頂点解析法は回路素子パラメータ間の相関関係を考慮しないため、素子パラメータの変動範囲を実際の変動可能な範囲よりも大きめに設定してしまい、結果として過大評価となるため、不必要的スペックのマージンがとられて回路設計が厳しくなる。結局、これらの評価結果が回路設計の確度に悪影響を及ぼすことになる。

【0005】本発明は、上述した点に鑑みてなされたものであり、的確且つより現実的なワーストケースを解析でき、回路設計の確度の向上を可能とした集積回路シミュレーション方法を提供することを目的とする。

【0006】

【課題を解決するための手段】上記目的を達成するため、本発明の集積回路シミュレーション方法では、集積回路のワーストケース解析において、非線形計画法を用いてシミュレーションを行う際に、素子パラメータの相関範囲を規定する。また、素子パラメータの相関範囲を規定するのに、線形近似により相関範囲の境界条件を規定した式を用いる。

2

【0007】

【作用】集積回路のワーストケース解析において、その解析に非線形計画法を適用することにより、回路特性の単調性に依存せずに、比較的少ない回路シミュレーション回数で過小評価とならないワーストケースを見い出すことができる。また、回路素子パラメータ間の相関範囲を規定するのに、線形近似する方法を用いることにより、素子パラメータの変動範囲をより現実的に分析し、過大評価とならないワーストケースを発見することができる。

【0008】

【実施例】以下、本発明の実施例につき図面に基づいて詳細に説明する。図1は、本発明による集積回路シミュレーション方法の処理手順を示すメインフローチャートである。図1において、先ず、トランジスタの飽和電流 I_s 、エミッタ接地直流電流増幅率 h_{FE} 、順方向アーリー電圧 V_A 等の素子パラメータの上下限およびそれらの相関データを解析装置(図示せず)の入力部より入力し(ステップS11)、次に素子パラメータの相関範囲を規定する境界条件の近似式を導き出し(ステップS12)、しかる後、導き出した素子パラメータの相関範囲の境界条件を制約条件として非線形計画法を用いてワーストケースを求める(ステップS13)。そして、最後に解析結果を上記解析装置の表示部に表示する(ステップS14)。

【0009】次に、ステップS13の具体的な処理手順につき、図2のフローチャートに沿って説明する。なお、集積回路の回路定数の最適化は、指定された条件において回路応答によって構成される目標関数を最小化する問題として定式化される。図2において、先ず、最適化の繰り返し過程の収束判定のパラメータ ϵ 、 δ の値を設定し(ステップS21)、続いて乱数を用いてランダムにN個のサンプル点 x^1, \dots, x^N を生成し、各点における目標関数値 z^1, \dots, z^N を計算する(ステップS22)。

【0010】ここで、変数 x の構成する n 次空間の領域でN個のサンプル点 x^p ($p = 1, \dots, N$) における目標関数値 z^p ($= F(x^p)$) が与えられたとき、任意の x における $F(x)$ のモデル関数 $f(x)$ を、次式によつて定義する。

【数1】

$$f(x) = \mu + \sum_{p=1}^N \gamma_p C_p(x) = \mu + \gamma^\top C(x)$$

【数2】

$$C_p(x) = \exp \left[- \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_i^p)^2}{2 \rho^2} \right]$$

50 【数3】

$$\gamma = S^{-1} (Z - \mu I)^3$$

但し、

【数4】

$$x_i, x_i^p (p = 1, \dots, N)$$

はそれぞれベクトル x および x^p の成分を表し、 μ は $N \times 1$

$$S_{pq} = \exp \left[- \frac{\sum_{i=1}^N (x_i^p - x_i^q)^2}{2 \rho^2} \right] (p, q = 1, \dots, N)$$

で与えられる。

【0011】任意の点 x におけるモデル関数の分散 $s^2(x)$ は次のようになる。

【数6】

$$s^2(x) = \sigma^2 [1 - C(x) S^{-1} C^T(x)]$$

但し、 σ^2 は、 z^1, \dots, z^N の分散

【数7】

$$\sigma^2 = (\sum_{p=1}^N (z^p - \mu)^2) / N$$

で、 σ は標準偏差である。

【0012】モデル関数を最小化することによって目標関数の最小値を求めるには、モデル関数の近似の程度を表わすパラメータとして、標準偏差 $s(x)$ をサンプル値 z^p ($p = 1, \dots, N$) の平均値 μ で規格化した分散係数 $CV(x)$ (Coefficient of Variance) を定義する。すなわち、

【数8】

$$CV(x) = \frac{s(x)}{\mu}$$

$CV(x)$ は、 x においてモデル関数のもつあいまいさを、目標関数の平均値に対する相対値で表した量である。

【0013】そこで、数1～数3、数5、数6および数※

$$A = \{P | L_i \leq p_i \leq U_i, i = 1, \dots, n\}$$

但し、 P は n 次元のパラメータベクトル、 L_i と U_i はそれぞれ i 番目のパラメータ p_i の上限と下限である。集積回路の場合、素子パラメータ間には、上述の変動範囲内でさらに何らかの相関関係がある。

【0016】普通、 j 番目パラメータ p_j と i 番目パラメータ p_i の間には、近似的に二次正規分布の如き相関関係があると考えられる。図3は、このような相関関係の説明図である。図3において、ハッティングで描かれた梢円部分は p_j と p_i の相関分布範囲であり、この梢円以外の区域は現実上パラメータの変動が不可能な区域である。

【0017】本発明によるシミュレーション方法においては、計算の簡略化のために、このような梢円領域に対して線形近似でその境界条件を求める方法を用いてい

*個のサンプル値 z^p の平均値、 I はすべての要素が1である N 行 1 列の行列、 Z は z^p を要素とする N 行 1 列の行列である。また、 S は N 個のサンプル点の共分散行列で、その要素は、

【数5】

10※8 を用いてモデル関数 $f(x)$ および分散係数 $CV(x)$ を計算する（ステップS23）。次に、サンプル値 z^p ($p = 1, \dots, N$) の最小値 z^{min} を求める。 $f(x)$ が z^{min} となる点 x^{min} を初期値として、PH(Pavani-Himmelbrau)法を用いて数9の制約条件付き最適化問題を解き、モデル関数 $f(x)$ の最適値(x^*) および最適点 x^* を求める（ステップS24）。

【数9】

$$\min_x f_k(x) \quad x \in A \\ CV_k(x) \leq \delta$$

20

【0014】そして、 $f(x)$ が z^{min} となる点 x^{min} とモデル関数 $f(x)$ の最適点 x^* との距離が十分小さくなかったか否かを判断し（ステップS25）、十分小さくなったら、最適点 x^* を目標関数 $F(x)$ の1つの極小点とし（ステップS26）、一連の計算を終了し、それ以外の場合には、最適点 x^* をサンプル点に加え（ステップS27）、かかる後ステップS23に戻る。以上の一連の処理が、非線形計画法によるワーストケース解析の処理である。

【0015】一般に、回路素子パラメータが n 個あるとすると、その値の変動範囲は次の集合で表すことができる。

【数10】

る。先ず、 k 番目の相関関係を以下のようにして求める。すなわち、実測データに基づき、梢円の長軸である直線を数11の式のような回帰直線として最小自乗法で求める。

【数11】

$$p_k = a_k p_i + b_k$$

但し、 a_k と b_k は求められる定数である。

【0018】次に、二次正規分布の広がりを表わす梢円の短軸 t_k を実測データから求めた後、数11で与えられる直線に平行な2本の直線およびパラメータ p_k と p_i の上下限でこの梢円区域の境界の近似を行う。すなわち、パラメータの相関範囲の境界条件は数12に示す各式で与えられる。

【数12】

$$\left. \begin{array}{l} L_i \leq p_j \leq U_i \\ L_i \leq p_j \leq U_i \\ a_k p_i + b_k - b_k' \leq p_j \leq a_k p_i + b_k + b_k' \end{array} \right\}$$

但し、

【数13】

$$b_k' = t_k \sqrt{1 + a_k^2}$$

である。

【0019】数12で定めた領域は、図3に示した太線で囲まれている領域であり、梢円領域と比べ多少のずれを生じるもの、実測データに合わせ込む相関範囲として妥当な区域であると考えられる。なお、上述した近似処理は、図1のステップS12で行われる。

【0020】一方、ワーストケース解析は、図1のステップS13、即ち先述した図2のフローチャートに沿った処理によって行われる。一般に、ワーストケースは数10で定められた領域Aの中でのパラメータベクトルP*

$$\left. \begin{array}{l} \min \phi(P), \quad P \in A \\ \text{Subject to} \\ b_k' - |p_i - (a_k p_i + b_k)| \geq 0, \quad i \neq j, \quad k=1, \dots, r \end{array} \right.$$

但し、rは相関関係の数である。上述の定式化によつて、ワーストケース解析問題は非線形計画問題として帰着されるので、汎用的制約条件付き非線形計画の各手法を適用することができるところになる。

【0022】

【発明の効果】以上説明したように、本発明によれば、集積回路のワーストケース解析において、その解析に非線形計画法を適用することにより、回路特性の単調性に依存せずに、比較的少ない回路シミュレーション回数で過小評価とならないワーストケースを見い出すことができ、しかも回路素子パラメータ間の相関範囲を規定するのに、線形近似する方法を用いることにより、素子パラメータの変動範囲をより現実的に分析し、過大評価とな

*によって構成されたn次元パラメータ空間の中にある回路特性の(P)の最小点または最大点と等価である。この視点から、ワーストケース解析問題は次の非線形計画問題に帰着することができる。

【数14】

$$\min \phi(P), \quad P \in A$$

【0021】最大点の場合、数14のφ(P)に負号を付ければ同一の問題として取り扱える。素子パラメータ間の相関を考慮する場合、ワーストケース解析問題は、数14に相関範囲の境界条件となる数12を加えて、制約条件付き非線形計画問題に書き換えることができる。

【数15】

らないワーストケースを発見することができるので、的確且つ現実的なワーストケースを解析でき、回路設計の確度を向上させることができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明による集積回路シミュレーション方法の処理手順の一実施例を示すフローチャートである。

【図2】非線形計画法によるワーストケース解析の処理手順を示すフローチャートである。

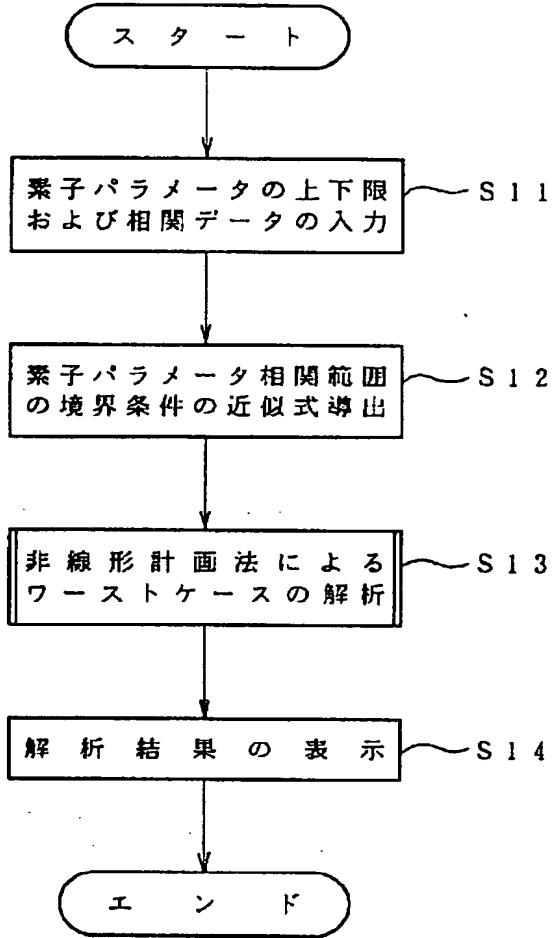
【図3】素子パラメータ間の相関関係の説明図である。

【符号の説明】

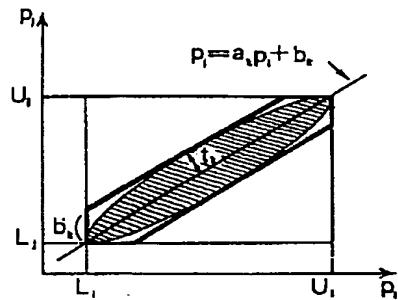
p_j: j番目のパラメータ

p_i: i番目のパラメータ

【図1】

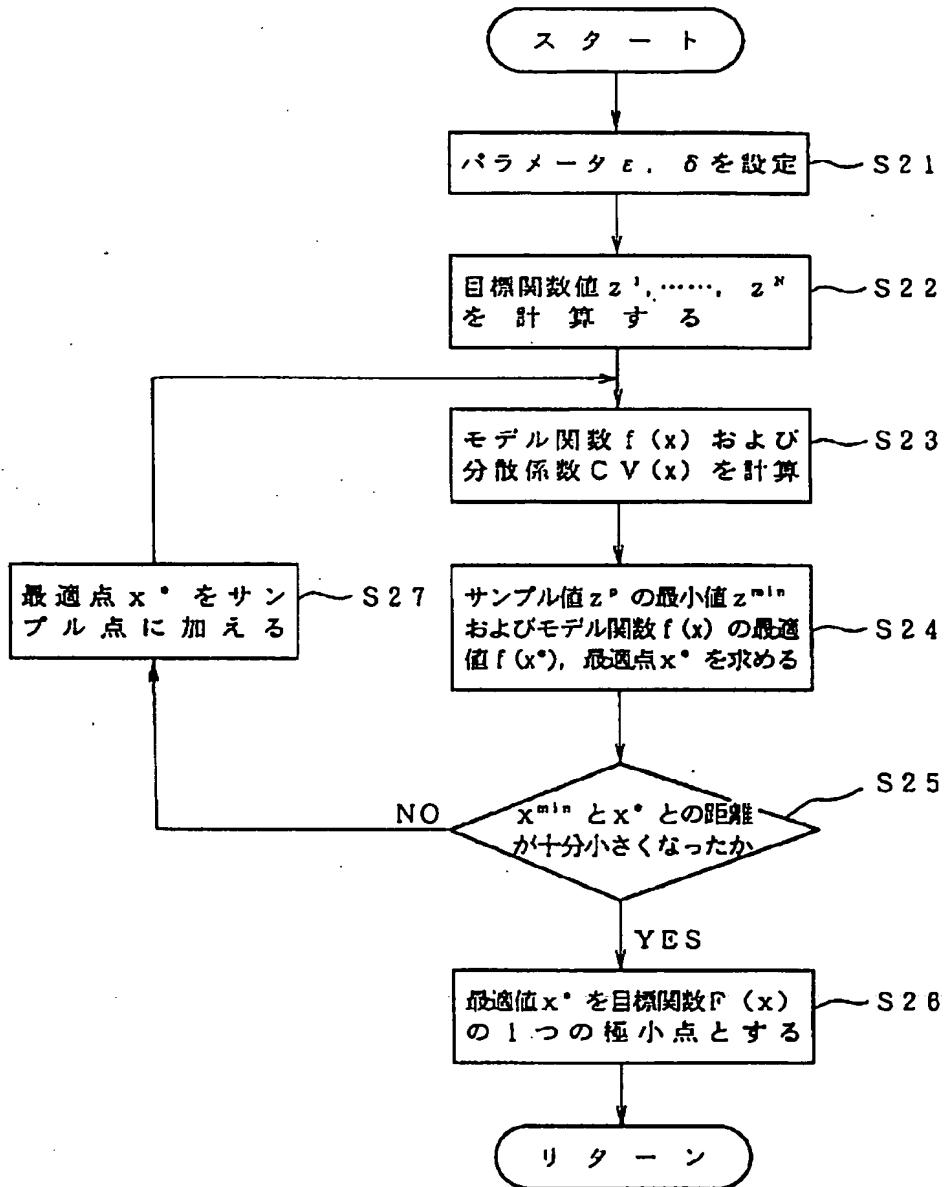


【図3】



素子パラメータ相関関係の説明図

【図2】



非線形計画法によるワーストケース解析のフローチャート

フロントページの続き

(72)発明者 高橋 政章
 東京都品川区北品川6丁目7番35号 ソニ
 一株式会社内